



《中国工程物理研究院科技丛书》第067号

螺旋波动力学及其控制

Spiral Wave Dynamics and Its Control

王光瑞 袁国勇 著



科学出版社

《中国工程物理研究院科技丛书》 第 067 号

螺旋波动力学及其控制

Spiral Wave Dynamics and Its Control

王光瑞 袁国勇 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是螺旋波动力学领域的一本专著。螺旋波是在远离平衡态条件下系统产生的一种斑图,可激、振荡及双稳等系统中都存在螺旋波斑图,是自然界中较为普遍的一种现象,它涉及物理、数学、化学及医学生物学等学科,研究它具有重要的理论意义和应用价值。

本书对螺旋波动力学理论与实验作了基础性、系统性的较全面的论述,是一本前沿科学领域的专著,可供理论物理学专业及非线性科学研究的科技工作者、研究生及高校学生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

螺旋波动力学及其控制=Spiral Wave Dynamics and Its Control / 王光瑞, 袁国勇著. —北京: 科学出版社, 2014.6

(中国工程物理研究院图书馆藏)

ISBN 978-7-03-041037-3

I. ①螺… II. ①王… ②袁… III. ①波动力学 IV. ①O413.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第127785号

责任编辑: 杨悦雷 李杰

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年11月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014年11月第一次印刷 印张: 23

字数: 550千字

定价: 169.00元

《中国工程物理研究院科技丛书》

出版说明

中国工程物理研究院建院 50 年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科技任务。通过完成任务,在许多专业领域里,不论是在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人才。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 50 年来在各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过的 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书自 1989 年开始出版,在今后一段时期还将继续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 50 年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》

编审委员会

2008 年 5 月 8 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》

第七届编审委员会

学术顾问：杜祥琬

编委会主任：彭先觉

副主任：孙承纬 汪小琳 赵武文

委员(以姓氏笔划为序)：

王 韬	帅茂兵	田 勇	李 凡	李正宏
李泽仁	李敬明	吴兴春	何建国	何宴标
张 凯	张 健	张文平	张方晓	张保汉
陈贤林	罗文华	孟凡宝	赵 峰	赵 强
赵小东	袁光伟	莫 军	黄秀光	彭述明
舒远杰	曾 超	魏晓峰		

科技丛书编辑部 李天惠

《中国工程物理研究院科技丛书》已出版书目

(按出版时间排序)

- | | | | |
|-----|--------------------------|---------|-------------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能
董海山 周芬芬 主编 | 科学出版社 | 1989 年 11 月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术
谭显祥 编著 | 科学出版社 | 1990 年 02 月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学
章冠人 陈大年 编著 | 国防工业出版社 | 1991 年 09 月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法
胡家贇 著 | 科学出版社 | 1991 年 12 月 |
| 005 | 映象与混沌
陈式刚 编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 06 月 |
| 006 | 再入遥测技术 (上册)
谢铭勋 编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 06 月 |
| 007 | 再入遥测技术 (下册)
谢铭勋 编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 12 月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论
李世昌 著 | 国防工业出版社 | 1992 年 10 月 |
| 009 | 粘性消去法和差分格式的粘性
郭柏灵 著 | 科学出版社 | 1993 年 03 月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用
张俊哲 等 著 | 科学出版社 | 1993 年 05 月 |
| 011 | 半导体材料的辐射效应
曹建中 等 著 | 科学出版社 | 1993 年 05 月 |
| 012 | 炸药热分析
楚士晋 著 | 科学出版社 | 1993 年 12 月 |
| 013 | 脉冲辐射场诊断技术
刘庆兆 等 著 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |
| 014 | 放射性核素活度测量的方法和技术
古当长 著 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |
| 015 | 二维非定常流和激波
王继海 著 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |

- | | | | | |
|-----|-------------------|----------------|---------|-------------|
| 016 | 抛物型方程差分方法引论 | 李德元 陈光南 著 | 科学出版社 | 1995 年 12 月 |
| 017 | 特种结构分析 | 刘新民 韦日演 编著 | 国防工业出版社 | 1995 年 12 月 |
| 018 | 理论爆轰物理 | 孙锦山 朱建士 著 | 国防工业出版社 | 1995 年 12 月 |
| 019 | 可靠性维修性可用性评估手册 | 潘吉安 编著 | 国防工业出版社 | 1995 年 12 月 |
| 020 | 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析 | 陈元金 编著 | 国防工业出版社 | 1997 年 01 月 |
| 021 | 近代成像技术与图像处理 | 吴世法 编著 | 国防工业出版社 | 1997 年 03 月 |
| 022 | 一维流体力学差分方法 | 水鸿寿 著 | 国防工业出版社 | 1998 年 02 月 |
| 023 | 抗辐射电子学——辐射效应及加固原理 | 赖祖武 等 编著 | 国防工业出版社 | 1998 年 07 月 |
| 024 | 金属的环境氢脆及其试验技术 | 周德惠 谭 云 编著 | 国防工业出版社 | 1998 年 12 月 |
| 025 | 实验核物理测量中的粒子分辨 | 段绍节 编著 | 国防工业出版社 | 1999 年 06 月 |
| 026 | 实验物态方程导引 (第二版) | 经福谦 著 | 科学出版社 | 1999 年 09 月 |
| 027 | 无穷维动力系统 | 郭柏灵 著 | 国防工业出版社 | 2000 年 01 月 |
| 028 | 真空吸取器设计及应用技术 | 单景德 编著 | 国防工业出版社 | 2000 年 01 月 |
| 029 | 再入飞行器天线 | 金显盛 著 | 国防工业出版社 | 2000 年 03 月 |
| 030 | 应用爆轰物理 | 孙承纬 卫玉章 周之奎 著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 031 | 混沌的控制、同步与利用 | 王光瑞 于熙龄 陈式刚 编著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 032 | 激光干涉测速技术 | 胡绍楼 著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 033 | 气体炮原理及技术 | 王金贵 编著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 034 | 一维不定常流与冲击波 | 李维新 编著 | 国防工业出版社 | 2001 年 05 月 |

- 035 X射线与真空紫外辐射源及其计量技术
孙景文 编著
国防工业出版社 2001年08月
- 036 含能材料热谱集
董海山 胡荣祖 姚朴等 编著
国防工业出版社 2001年10月
- 037 材料中的氦及氖渗透
王佩璇 宋家树 编著
国防工业出版社 2002年04月
- 038 高温等离子体X射线谱学
孙景文 编著
国防工业出版社 2003年01月
- 039 激光核聚变靶物理基础
张钧 常铁强 著
国防工业出版社 2004年06月
- 040 系统可靠性工程
金碧辉 主编
国防工业出版社 2004年06月
- 041 核材料 γ 特征谱的测量和分析技术
田东风 龚健 伍钧等 编著
国防工业出版社 2004年06月
- 042 高能激光系统
苏毅 万敏 编著
国防工业出版社 2004年06月
- 043 近可积无穷维动力系统
郭柏灵 高平 陈瀚林 著
国防工业出版社 2004年06月
- 044 半导体器件和集成电路的辐射效应
陈盘训 著
国防工业出版社 2004年06月
- 045 高功率脉冲技术
刘锡三 编著
国防工业出版社 2004年08月
- 046 热电池
陆瑞生 刘效疆 编著
国防工业出版社 2004年08月
- 047 原子结构、碰撞与光谱理论
方泉玉 颜君 著
国防工业出版社 2006年01月
- 048 非牛顿流动力系统
郭柏灵 林国广 尚亚东 著
国防工业出版社 2006年02月
- 049 动高压原理与技术
经福谦 陈俊祥 主编
国防工业出版社 2006年03月
- 050 直线感应电子加速器
邓建军 主编
国防工业出版社 2006年10月
- 051 中子核反应激发函数
田东风 孙伟力 编著
国防工业出版社 2006年11月
- 052 实验冲击波物理导引
谭华 著
国防工业出版社 2007年03月
- 053 核军备控制核查技术概论
刘成安 伍钧 编著
国防工业出版社 2007年03月

- | | | | | |
|------------|-------------------------|------------------|---------|-------------|
| 054 | 强流粒子束及其应用 | 刘锡三 著 | 国防工业出版社 | 2007 年 05 月 |
| 055 | 氚和氦的工程技术 | 蒋国强 罗德礼 陆光达 等 编著 | 国防工业出版社 | 2007 年 11 月 |
| 056 | 中子学宏观实验 | 段绍节 编著 | 国防工业出版社 | 2008 年 05 月 |
| 057 | 高功率微波发生器原理 | 丁 武 著 | 国防工业出版社 | 2008 年 05 月 |
| 058 | 等离子体中辐射输运和辐射流体力学 | 彭惠民 编著 | 国防工业出版社 | 2008 年 08 月 |
| 059 | 非平衡统计力学 | 陈式刚 编著 | 科学出版社 | 2010 年 02 月 |
| 060 | 高能硝胺炸药的热分解 | 舒远杰 著 | 国防工业出版社 | 2010 年 06 月 |
| 061 | 电磁脉冲导论 | 王泰春 贺云汉 王玉芝 著 | 国防工业出版社 | 2011 年 03 月 |
| 062 | 高功率超宽带电磁脉冲技术 | 孟凡宝 主编 | 国防工业出版社 | 2011 年 11 月 |
| 063 | 分数阶偏微分方程及其数值解 | 郭柏灵 蒲学科 黄凤辉 著 | 科学出版社 | 2011 年 11 月 |
| 064 | 快中子临界装置和脉冲堆实验物理 | 贺仁辅 邓门才 编著 | 国防工业出版社 | 2012 年 02 月 |
| 065 | 激光惯性约束聚变诊断学 | 温树槐 丁永坤 等 编著 | 国防工业出版社 | 2012 年 04 月 |
| 066 | 强激光场中的原子、分子与团簇 | 刘 杰 夏勤智 傅立斌 著 | 科学出版社 | 2014 年 02 月 |
| 067 | 螺旋波动力学及其控制 | 王光瑞 袁国勇 著 | 科学出版社 | 2014 年 11 月 |

前 言

螺旋波是在远离平衡态条件下系统产生的一种斑图，具有重要的理论研究意义和应用价值。它涉及物理、数学、力学、天文、化学、生物和医学等学科。1946年，Wiener与Rosenbluth引入了可激媒质的概念来解释由螺旋波引起的心动过速。他们提出了不应(refractory)、可激、激发态、螺旋波等概念。1952年，Turing(图灵)提出了反应扩散模型中斑图形成的机制。20世纪60年代末，Zaikin与Zhavotinsky(扎布今斯基)在一薄层无搅拌溴酸亚铁和溴酸的反应液中观察到靶波图样，这被认为是化学系统中时空斑图形成的最早记录。而后两年，Winfree(维夫瑞)在Belousov-Zhabotinsky(BZ)反应中发现了自持的旋转螺旋波。自此以后，螺旋波斑图的理论、数值及实验研究开始被人们广泛关注。1991年，Swinney与Krinsky在*Physica D*杂志中专门刊登了化学与生物媒质中波与斑图的论文，介绍了螺旋波的主要理论、实验及数值结果。20世纪90年代中期，Hagberg与Meron详细地研究了双稳系统，发现在远离平衡伊辛-布劳克相变边界的布劳克区内也存在着稳定的、双稳型的螺旋波斑图。至此，可激、振荡及双稳系统都存在螺旋波斑图。可激媒质系统具有单一的定态，当扰动强度超过阈值时，系统会经历远离此不动点的激发过程和恢复到定态的恢复过程。可激系统在物理等众多领域中相当普遍，最为典型的是BZ系统和心肌系统。在振荡系统中，不存在稳定的定态，而被相空间的极限环所代替。复金兹堡-朗道方程是振荡BZ系统在Hopf分岔附近的振幅方程。与可激系统和振荡系统不同，双稳系统存在着两个定态。随着实验技术的提高，外力、反馈及噪声驱动下螺旋波的实验研究及两个系统耦合的研究成为可能。最近，人们又相继观察到了多臂螺旋波、超螺旋波、反螺旋波及分段螺旋波等多种形式，这些都丰富了螺旋波动力学的研究内容。另外，螺旋波的研究也渗透到很多其他的领域。

从1993年开始至今，作者一直开展相关领域的研究工作，发表了多篇论文(含综述文章一篇)，同时对螺旋波研究的百余篇文献及专著做了系统全面的调研与整理，并且针对已有专著的不足，本书对螺旋波理论作了基础性、系统性等全面论述。

本书主要从以下几部分讨论螺旋波动力学行为：

第1章主要介绍与非平衡斑图以及螺旋波有关的一些背景知识。

第2章主要介绍螺旋波形成与传播的一些基础理论，主要涉及支持螺旋波的可激、振荡及双稳系，螺旋波的形成，支配螺旋波动力学行为的色散关系与本构关系，间断激发所涉及行波或螺旋波的不应期、易损期、双向激发期以及螺旋波的对称性关系等。

第3章主要讨论螺旋波波头的运动，螺旋波的波头是一个奇点，它是可激波的源，螺旋波动力学的不同在很大程度上取决于波头运动的不同。

第4章主要阐述简单螺旋波、多臂螺旋波、超螺旋波、反螺旋波以及分段螺旋波等

的一些实验及理论。

第5章主要讨论螺旋波失稳的几种机制，在一些参数下，螺旋波会自发失稳，而进入时空湍流态。

第6章主要讨论噪声背景下螺旋波的动力学行为。噪声在任何系统中都是不可避免的，噪声的存在会使系统出现随机共振、相干共振等现象。

第7章主要介绍双层系统的螺旋波及三维卷波的动力学。

第8章主要讨论螺旋波及其自发失稳后时空混沌态的控制与消除。螺旋波及其自发失稳后的时空混沌往往是有害的，需要研究低振幅控制技术，这方面的内容在实际系统中是很有用的。这一章总结了近几十年来其控制、消除的方法。第3~8章包含我们自己的部分工作。

第9章着重介绍各个领域中的螺旋波动力学行为。

本书是一本理论物理前沿领域的专著，可供科技工作者及高等院校学生阅读。

著 者

于2012年9月25日

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 非平衡斑图及其动力学	1
1.2 螺旋波动力学及其控制	2
参考文献	4
第 2 章 螺旋波形成与传播	6
2.1 可激媒质、振荡媒质、双稳系统	6
2.2 螺旋波的产生	8
2.2.1 可激系统中的行波解	8
2.2.2 可激系统中行波指的演化	10
2.3 色散关系	14
2.4 程涵方程与本构关系	17
2.5 螺旋波的不应期、易损期与“激发双向传播波”期	20
2.5.1 不应期、易损期在螺旋波研究中的重要地位	20
2.5.2 一维可激媒质中易损期的测量与分析	22
2.5.3 易损期中周期激发的化学波反应	31
2.6 螺旋波与对称性	35
参考文献	36
第 3 章 螺旋波波头的运动	38
3.1 螺旋波的波头运动	38
3.1.1 波头与障碍的分离(边界层分析)	38
3.1.2 螺旋波波尾与波头的关系及波头漫游的两圆描述	44
3.1.3 螺旋波波头从简单周期旋转到漫游运动的数值模拟结果	45
3.1.4 螺旋波波头从周期旋转到漫游运动的实验结果	48
3.2 波头运动的理论与分析方法	50
3.2.1 边界层分析	50
3.2.2 从简单螺旋波到漫游螺旋波的分岔分析	53
3.2.3 螺旋波波头运动的常微分方程描述	56
3.2.4 螺旋波漫游的主要机制	58
3.3 对流对螺旋波波头运动的影响	63
3.3.1 电场引发的波头移动与螺旋波形变	64
3.3.2 电场引发的波头平行与反平行移动	67

3.3.3 弱形变近似分析及交流电场引发的螺旋波移动	69
3.3.4 不同偏振电场引发的螺旋波移动	71
3.4 不均匀媒质中的波头运动	74
3.5 外力作用下螺旋波波头的运动	75
3.5.1 参数周期调制下的波头运动	76
3.5.2 周期外力驱动下的波头运动	84
3.5.3 周期驱动下波头运动的常微分方程描述	90
参考文献	94
第4章 螺旋波的几种常见形式	98
4.1 超螺旋波	98
4.2 反螺旋波(向内传播螺旋波)	102
4.2.1 BZ-AOT 实验中的反传播螺旋波与数值模拟	102
4.2.2 CGLE 与反应扩散方程中反螺旋波的参数分析	105
4.3 多臂螺旋波	110
4.3.1 多臂螺旋波形成及一些性质	111
4.3.2 多臂螺旋波的频率与多个螺旋波共存时的相互作用	115
4.3.3 几个模型中多臂螺旋波的参数区	117
4.4 分段螺旋波	120
4.4.1 BZ-AOT 实验中的分段螺旋波	120
4.4.2 反应扩散模型中的分段螺旋波	124
4.4.3 CDIMA 反应中的分段螺旋波与时空横向失稳	126
4.4.4 双层可激系统中的分段螺旋波	130
参考文献	133
第5章 螺旋波的失稳	135
5.1 BZ 反应中螺旋波自发失稳的机制	135
5.1.1 爱克豪斯失稳	135
5.1.2 多普勒失稳	138
5.1.3 三维效应引发的失稳	141
5.1.4 径向方程失稳的讨论	145
5.2 外力作用下导致的螺旋波破碎	153
5.3 心脏离子模型中螺旋波破碎机制的讨论	157
参考文献	174
第6章 噪声作用下的螺旋波动力学行为	176
6.1 随机模型的数值与解析分析方法	176
6.1.1 随机偏微分方程与格子方程	177
6.1.2 平均场近似与短时(short time)分析	179
6.1.3 等效有效噪声模型(noise-effective model)与中心矩近似	180
6.1.4 白噪声与结构噪声的数值算法	181

6.2 噪声引发的时空结构	183
6.2.1 局部耦合随机 FHN 振子列的时空结构	183
6.2.2 随机反应-扩散系统中的时空斑图结构	189
6.3 噪声引发的转变	197
6.4 噪声引发的随机共振与相干共振现象	202
6.5 噪声导致螺旋波的无序与破碎现象	211
参考文献	215
第 7 章 双层系统的螺旋波动力学行为	217
7.1 双层 FHN 系统的螺旋波动力学行为	217
7.1.1 双层 FHN 系统的行波脉冲的动力学行为	219
7.1.2 双层 FHN 系统中螺旋波的动力学行为	224
7.1.3 双层 FHN 系统中螺旋波的竞争与演化	228
7.1.4 不一致双层 FHN 系统中螺旋波的动力学行为	230
7.2 延迟耦合双层 FHN 系统的螺旋波动力学行为	233
7.2.1 两点延迟耦合的动力学行为	234
7.2.2 双层延迟耦合 FHN 系统的动力学行为	236
7.3 双层 CGLE 系统的动力学行为	244
7.4 双层系统实验设计及其他一些斑图结构	246
7.5 三维卷波	249
参考文献	250
第 8 章 螺旋波与时空湍流的控制	251
8.1 时间混沌的控制	251
8.2 时空混沌的控制	253
8.2.1 CGLE 中时空混沌的 Pyragas 控制方案	254
8.2.2 CGLE 中时空混沌的多延迟反馈控制	258
8.3 可激系统中螺旋波及其失稳后时空湍流态的反馈控制	261
8.3.1 螺旋波的稳定化控制——阻止螺旋波失稳	262
8.3.2 螺旋波的消除控制	266
8.3.3 螺旋波运动的控制	271
8.4 可激系统中螺旋波及其失稳后时空湍流态的外力控制	276
8.4.1 螺旋波稳定化控制——从漫游到刚性旋转	277
8.4.2 常外力、常力脉冲消除螺旋波	279
8.4.3 时间外力消除螺旋波与时空湍流(螺旋混沌)	282
8.4.4 波外力消除螺旋波与时空湍流	285
8.4.5 局部周期起搏消除螺旋波与时空湍流	289
8.4.6 沿网格线低振幅电击除颤	296
参考文献	298
第 9 章 一些系统中的螺旋波	300

9.1	化学反应-扩散系统中的螺旋波	300
9.2	心肌与脑皮层中的螺旋波	303
9.2.1	心肌中的可激电波与螺旋波	303
9.2.2	脑皮层中的可激电波与螺旋波	308
9.3	生物系统中的螺旋波	313
9.3.1	黏性霉菌的自组织过程中的螺旋波	314
9.3.2	非洲爪蟾卵细胞中的钙螺旋波	318
9.4	密度引力螺旋波及多臂螺旋星系	322
9.5	液晶中的螺旋波	325
9.6	光学系统的斑图与螺旋波	330
9.6.1	光学斑图的形成简介	330
9.6.2	非线性光学系统中的螺旋波	333
9.7	气体放电中螺旋波斑图动力学	337
9.8	流体力学中的螺旋波	340
	参考文献	343
	索引	347
	后记	349

第 1 章 概 论

1.1 非平衡斑图及其动力学

失稳的发生与对称的破碎导致的宏观时空结构也许是自然界复杂动力学中最令人感兴趣的方面之一。处于远离平衡状态的物理、化学等诸多系统可以经历一系列失稳而形成各种各样的时空结构。很多年来,对处于远离平衡态的开放系统中时空有序根源、空间结构选择机制及其对称性的探讨等一直为人们所关注^[1-7]。与此同时,它所涉及的领域也在不断延展,已包括物理、化学、生物、医学、力学、天文等众多学科。

在非平衡系统斑图的研究中, Rayleigh-Bénard 对流是一个重要的例子,与其他系统相比,对 Rayleigh-Bénard 对流的研究有很多优势。例如,描述 Rayleigh-Bénard 对流的宏观方程是速度场 Navier-Stokes 方程,具有明确的基本方程;理论研究与实验研究有紧密联系,实验能够验证理论上的一些观点等。化学反应系统中的自持振荡的实验观察可以追溯到 20 世纪早期,1917 年 Bray 偶然观察到化学振荡后,1959 年, Belousov 在丙二酸的氧化反应中观测到规则的可重复的振荡(1951 年发现,所写论文被杂志编辑拒绝,1959 年在俄罗斯的一个医学会议的文集中出版了其简短论文)。1964 年, Zhabotinskii 继续 Belousov 的工作,确认了振荡的存在,这就是著名的 Belousov-Zhabotinskii(BZ)反应。20 世纪 70 年代,这个重要的反应及其振荡类波性质开始引起西方国家科学界的重视,引发了人们对 BZ 反应的极大兴趣, Belousov 的原始工作也得到了公认,1980 年, Belousov 因此而获得列宁奖。目前关于 BZ 反应的基本实验结果如下:特定条件的搅拌系统能显示分钟量级上的周期振荡;在处于稳定态的非搅拌系统中,能激发一圆形脉冲和靶波;如果单个脉冲被截断,脉冲在截断端点开始卷起形成螺旋波;在三维情况可以观察到卷波。生物学中的非平衡斑图研究可以追溯到对动物皮肤上斑点、条纹等的思考,1952 年, Turing 提出自己的理解,他设想存在两种化学物质(称为“成形素”),它们作用于动物皮肤的二维空间,如果一种成形素引起毛发变黑,另一种成形素保持毛发为白色,则发生在两种成形素中的各种反应与动物皮肤中化学扩散的不均匀决定了动物皮肤斑图, Turing 称它们为“反应-扩散方程”。实验上首次观测到图灵斑图是在 1990 年(在亚氯酸盐-碘化物-丙二酸的反应中),实验中的观测验证了理论预测。

非平衡斑图可以是静止的(如动物身上的图样),也可以是移动的(如旋转螺旋波)。非线性、远离平衡态是非平衡斑图形成的必要条件,斑图的形成也是局部动力学与扩散输运相互作用的结果。静止斑图最重要的例子是图灵斑图(图 1.1 中左上图),源于 Turing 对动物皮肤图样的思考。非静止的非平衡斑图主要包括行波(travelling wave)、

靶波(target wave)以及螺旋波。其中行波是最简单的一种形式,它可以是周期的也可以是非周期的,在一维情况下,非周期波又可以分为脉冲(pulse)与扭结(kink),如图 1.2 所示。对于脉冲,其通过后系统的状态不改变;对于扭结,波峰前面系统的态不同于波峰后面的态。在二维或三维空间,局部的激发会形成向外传播的波,称为靶波。心脏中窦房结发出的正常电信号可以看成靶波。最具有研究意义的应该是螺旋波,也是本书主要介绍的内容。在 Zaikin 与 Zhabotinsky 观测到靶波两年后,Winfree 在 BZ 反应中观测到螺旋波,现在螺旋波已经出现在很多领域中,如心脏、Belousov-Zhabotinskii(BZ)反应、脑神经元、正在聚集的黏性霉菌、小鸡的视网膜、卵细胞、铂催化剂表面的一氧化碳氧化、垂直磁场中的液晶、等离子体放电以及泵浦激光系统等。



图 1.1 自然界中斑图形成的例子

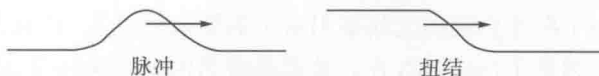


图 1.2 自然界中斑图形成的例子

1.2 螺旋波动力学及其控制

经过国内外科学工作者近些年来研究,人们对螺旋波的动力学有了比较清楚的认识^[8]。螺旋波的形成是局部非线性动力学与扩散输运相互作用的结果,它要求系统是非线性、远离平衡态的。螺旋波不仅存在于可激系统与振荡系统中,Merón 等在双稳系统中也观察到了双稳型螺旋波。除了通常意义的螺旋波外,人们又先后从实验和数值模拟中发现了超螺旋波、多臂螺旋波以及分段螺旋波(在 BZ-AOT 实验中能观测到由许多短段组成的螺旋波;在双层系统的数值模拟中能观察到由许多细条组成的分段螺旋波)等几种形式^[9-13]。移动坐标系^[14]中的理论分析表明,螺旋波的动力学行为由色散关系与本构关系共同决定。螺旋波的组织中心从数学上讲是一个奇异点,螺旋波的所有动力学行为都受到这个点的影响,如何描述这个点缺陷仍是螺旋波动力学研究的一个难点。陆启韶教授等曾应用摄动法对螺旋波波头的运动规律进行研究;Barkley 等在没有严格推导的情